

セラミックスの延性モード研削に関する基礎的研究

著者	吉田 武司
号	2244
発行年	1998
URL	http://hdl.handle.net/10097/7517

氏 名	吉田 武司 <small>よしだ たけし</small>		
授 与 学 位	博士 (工学)		
学 位 授 与 年 月 日	平成 11 年 3 月 25 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械電子工学専攻		
学 位 論 文 題 目	セラミックスの延性モード研削に関する基礎的研究		
指 導 教 官	東北大学教授 庄司 克雄		
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 庄司 克雄	東北大学教授 加藤 正名	
	東北大学教授 伊藤 耿一	東北大学助教授 厨川 常元	

論文内容要旨

セラミックスは、耐熱性、耐摩耗性などに優れた特性を有するため、機械部品の長寿命化や軽量化などで大きな効果が期待されている。セラミックスの加工においては、その加工法や仕上面粗さが部品強度の観点からも重要な意味をもっている。現在、主としてダイヤモンド砥石による研削加工が行われ、研削加工で生じた加工損傷をラッピングで除去する方法がとられている。しかし、加工損傷のないいわゆる延性モードの研削が容易に可能になれば、セラミックス製機械部品の生産性が飛躍的に改善されることが期待できる。セラミックスの延性モード研削を高能率で実現するためには、延性・ぜい性遷移点の臨界工具切込量を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、単粒研削試験により、4種類の構造用セラミックスの延性・ぜい性遷移挙動を定量的に評価し、延性・ぜい性遷移点の臨界砥粒切込み深さを明らかにすることを第1の目的とした。第2の目的は、単粒研削における単粒の切削作用および延性・ぜい性挙動が研削仕上面粗さ創成に及ぼす影響を明らかにすることにある。第3の目的は、平面研削における延性モードの研削を行い、研削における延性・ぜい性挙動と仕上面粗さおよび機械的強度の関係を調査することにある。そして研削仕上面粗さの実測値と理論値の比較を行い、単粒研削および平面研削加工によって得られた結果を基に、セラミックスの研削仕上面粗さ創成機構を明らかにすることを第4の目的とした。本論文の内容を以下に要約する。

第1章は、序論である。本研究の背景となるセラミックスの延性モード研削を行うことの必要性和重要性を指摘し、本研究の目的を明らかにした。

第2章「構造用セラミックスの機械的特性」では、難研削材料であるセラミックスを高品位に加工するためには、材料の特性を明らかにしておくことが必要であると考え、硬さ試験、曲げ試験および成分分析を行った。本研究で対象とした4種類の構造用セラミックスは、常圧焼結で作られたものであるが、試験結果から、一般に記載されている特性と相違がないことを確認した。曲げ試験からは、曲げ強さを求めるとともに、破面の SEM 観察を行い、セラミックスの結晶粒子形状および気孔の存在を調べた。

研削加工における砥粒切れ刃の切削作用を明らかにするためには、単粒研削試験が必要になる。第

3 章〔単粒研削におけるセラミックスの延性・ぜい性遷移挙動の評価〕では、正四角錐状に成形したダイヤモンド単粒を用いて、単粒研削を行った。試験機は、小型横軸平面研削盤を改造した単粒試験機を用いた。単粒研削を行うに当たり、研削溝の幾何学的形状を明らかにし、一定幅の研削溝を得るための条件を設定した。単粒研削溝の両縁に生成される盛上がりに着目し、盛上がり係数を定義した。盛上がり係数は、単粒と被削材の実際の接触面積と理論的接触面積の比である。盛上がり係数は、単粒研削における法線分力と半径切込量から求めた。法線分力は、単粒試験機の工具系に組み込んだ圧電動力計で測定した。その結果、盛上がり係数 C は、単粒研削における最大砥粒切込み深さ g_m が大きくなるほど小さくなった。そして C が 1 を越えると延性モードの研削になり、 C が 1 未満の場合にはぜい性モードの研削になった。 $C=1$ のときの臨界砥粒切込み深さ g_c は、セラミックスのビッカース硬さが大きいほど小さい値になった。したがって延性モードの研削を行いやすいセラミックスは、ジルコニア ($g_c=0.20\mu\text{m}$)、次いで窒化珪素 ($g_c=0.16\mu\text{m}$)、アルミナ ($g_c=0.13\mu\text{m}$) であり、炭化珪素 ($g_c=0.09\mu\text{m}$) は、4 種類の構造用セラミックスの中では最も小さい砥粒切込み深さによる研削が必要になることを明らかにした。

第 4 章〔セラミックスの研削溝生成に及ぼす延性・ぜい性挙動の影響〕では、単粒研削による盛上がりやぜい性破壊によって代表される延性・ぜい性挙動が仕上面創成に及ぼす影響を調べた。なお、通常金属とセラミックスの切削現象の違いを明らかにするために、ダイス鋼も単粒研削した。セラミックスの間にダイス鋼を挟み込んだ研削片を単粒研削した結果、ダイス鋼の単粒研削溝生成において確認された弾性回復による浅底効果は、セラミックスの場合ほとんど認められないことを明らかにした。最大砥粒切込み深さを大きくしていくと、延性モードの研削からぜい性モードの研削に移行するが、その遷移点近傍では研削溝側縁の盛上がりや研削溝側壁のぜい性破壊痕が共存する境界域が存在した。そこで、セラミックスの研削溝生成においては、溝側縁に盛上がりや生じる延性モードの研削溝と盛上がりやないぜい性モードの研削溝および盛上がりやぜい性破壊が共存する研削溝の 3 形態に分類した。また延性モードの研削では、単粒前縁に大きな盛上がりやが形成されること、ぜい性モードの研削では、結晶粒子単位での材料除去が行われていることを、単粒および研削溝に付着した切屑の SEM 写真観察から明らかにした。さらにぜい性モード研削溝の斜め切断面の SEM 写真観察から、アルミナ、炭化珪素の溝直下には亀裂またはボイドが生成され、これらが粒子単位での材料除去をもたらす原因であると考えた。このように、盛上がりや、ぜい性破壊、弾性回復、切屑形態の観点から、単粒の切削作用の違いを比較した。

さてセラミックスの研削では、延性モードまたはぜい性モードの研削溝が互いに干渉し合って仕上面粗さを生成することになる。そこで、延性モードの研削溝およびぜい性モードの研削溝を干渉させたときに生成される山の高さを調べた。その結果、延性モード域では、干渉によって形成される山の高さと幾何学的に計算される値との誤差は 10 % 以内であった。したがって、延性モード域における研削では、砥粒切れ刃の切削軌跡通りに仕上面粗さが創成されるであろうと予測した。

セラミックスの研削加工では、加工損傷のない延性モードの研削が必要になる。第 5 章〔セラミックスの延性モード研削〕では、セラミックスの平面研削加工を行い、単粒研削で生成されたような亀裂痕が全く見られない延性溝で構成される仕上面の創成がほんとうに可能なのかを、SEM および AFM による写真観察で検証した。また、砥石粒度を変数にしたときの仕上面粗さの変化、仕上面粗さと研削モードの関係およびぜい性モード研削における機械的強度低下について調べた。研削には、レジンボンドダイヤモンド砥石を使用した。その結果、細かい粒度の砥石を使用していくと（これは連続切れ刃間隔および砥粒切込み深さが小さくなることを意味している）、ぜい性モードの研削が延

性モードの研削に遷移し、仕上面粗さも小さくなる傾向にあった。ジルコニアでは、仕上面粗さが $1\mu\text{m}$ 以上の研削でも延性モードの研削が行われていた。延性モードの研削が最も行いやすいセラミックスは、ジルコニアで、次いで窒化珪素、アルミナであった。粒度 4000 の極微粒砥石による仕上面を AFM で測定・観察した結果、いずれも $30\text{nm}R_{\text{max}}$ 以下の粗さであり、加工損傷は全く見られなかった。しかし炭化珪素では、粒度 4000 の極微粒砥石においても研削仕上面には結晶粒子脱粒の痕が観察された。また、ぜい性モードの研削であっても、ジルコニアおよび窒化珪素は、焼結体の曲げ強さより大きい。しかし、ぜい性破壊型材料除去で研削が行われたアルミナ、炭化珪素では、研削仕上面直下のボイド生成の影響を受けるため、焼結体の曲げ強さより小さくなった。したがって、アルミナ、炭化珪素を構造用セラミックスとして選択し、研削加工によって機械的強度を低下させないためには、仕上面粗さが極めて小さい鏡面状態にしなければならない。

第 6 章〔セラミックスの研削仕上面粗さに及ぼす延性・ぜい性挙動の影響〕では、第 3 章、第 4 章の単粒研削および第 5 章の平面研削の結果を基に、セラミックスの研削仕上面粗さ創成機構を検討した。すなわち、延性モードの研削溝同士干渉では盛上がりはほとんど認められないことから、延性モード域における研削では、砥粒切れ刃の軌跡通りに仕上面粗さが創成されるであろうと予測した。そこで、実際の研削仕上面粗さと統計的な考え方によって求められる理論値との比較を試みた。研削砥石は、第 5 章で用いた 4 種類の研削砥石の中から、ジルコニアでは延性モードの研削になり、炭化珪素ではぜい性モードの研削になった粒度 500 のレジンボンドダイヤモンド砥石を使用した。そしてテーブル速度を変数にして、延性モードの研削とぜい性モードの研削の仕上面粗さ創成機構の違いを調べた。なお、本章においても、金属とセラミックスの違いを明らかにするために、ダイス鋼の仕上面粗さ創成機構についても合わせて検討した。また転写片材料として、カーボンを使用した。まず実験過程において、3 種類の材料の比研削エネルギーを求めた。その結果、ぜい性破壊型材料除去で切屑を分離するエネルギーは、せん断による切屑生成のエネルギーよりも小さくなることを明らかにした。さらに、連続研削の結果、ジルコニアでは砥粒切れ刃形状にほとんど変化が生じなかったが、炭化珪素の研削では目つぶれ型の砥粒切れ刃に変化し、研削力を増大させた。このように、ジルコニアと炭化珪素だけの研削特性を比較しても、明らかな違いが認められた。さて単粒研削で予測したように、延性モード研削におけるセラミックスの仕上面は、ほとんど砥粒切れ刃の軌跡通りに創成され、仕上面粗さの実測値と理論値との誤差は 10 % 以内であった。一方、ぜい性破壊型材料除去によるぜい性モードの研削では、理論値と実測値とは一致しない。しかも、被削材の結晶粒子径に関係すると考えられるほぼ一定の仕上面粗さになった。なお、金属のダイス鋼では、弾性回復による浅底効果と盛上がりが相互に関係して仕上面粗さを創成することがわかった。

第 7 章は、結論である。

現在、工業材料として、セラミックス、シリコンなどのいわゆる硬ぜい材料に対する期待が大きい。また、硬ぜい材料の機械加工における高品位化と高能率化に対する要求が高まっている。これを満足できる機械加工は、運動転写に基づいた研削加工であると考えられている。本研究は、このような背景を基に、代表的な硬ぜい材料である構造用セラミックスの延性モード研削を実現するための必要な基礎情報を得ることを研究の出発点とした。つまりセラミックスの変形破壊挙動やそれに及ぼす砥粒切込み深さの影響に着目し、単粒研削試験を通じて、延性・ぜい性遷移挙動、延性モード研削の臨界砥粒切込み深さを調べた。そして単粒研削試験結果を基に、延性モードとぜい性モードの研削機構の違い、セラミックスの種類による被研削特性の違いを明らかにした。

審査の結果の要旨

セラミックスや半導体、ガラスなどのいわゆる脆性材料でも、砥粒切込み深さを十分小さくすれば通常の金属と同様に延性的な挙動により切屑が生成されることは良く知られている。しかしこれまで、研削におけるこのような延性・脆性遷移点の存在は確認されていない。そこで著者は、成形したダイヤモンド工具を用いた研削のモデル実験により、脆性から延性に遷移する領域における材料の挙動を詳細に調べ、研削仕上面創成に及ぼす影響について検討した。本論文は、それらの成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、実験に供する4種類の常圧焼結セラミックスについて硬さ試験や曲げ試験、および圧痕や破断面のSEM観察を行っている。その結果に基づいて、粒界間に存在する微小な気孔が脆性破壊に重要な役割を果たすことを確認し、延性モード域で研削を行うには十分小さな砥粒切込み深さで研削を行う必要があることを示している。

第3章では、正四角錐状に成形したダイヤモンド工具を用いていわゆる単粒研削を行い、そのときの研削力と被削材の硬さをもとに盛上がり係数を定義し、研削時のセラミックスの挙動を定量化している。盛上がり係数は砥粒切込み深さが小さくなると増加し、1を越えると延性モード研削になり亀裂のない研削溝が形成されることを明らかにしている。そして盛上がり係数が1になるときの砥粒切込み深さを臨界砥粒切込み深さと名付けた。これは研削加工におけるいわゆる延性・脆性遷移点に相当するもので、その存在を定量的に示したものととして高く評価される。

第4章では、単粒研削による研削溝断面の詳細な測定やSEM観察を行って、前章の結果の妥当性を検証している。そして延性・脆性遷移点近傍には、盛上がり脆性破壊が共存する境界域が存在することを明らかにした。またセラミックスの場合には焼入れ鋼のような弾性回復による研削溝の浅底効果が見られないこと、研削溝同士の干渉による盛上がりが延性モード研削の場合でも10%以下であることを示している。これは、研削仕上面の創成機構を実験的に明らかにしたもので、研削理論を展開する上で重要な知見である。

第5章では、前章までの単粒研削に関する結果をもとに、粒度#4000の極微粒レジンボンドダイヤモンド砥石を用いて平面研削を行い、砥粒切込み深さを十分小さくすれば、延性モード研削が可能であることを実証している。

第6章では、第4章における結果から、セラミックスの延性モード研削では幾何学モデルに基づく研削仕上面粗さの理論値と実際の粗さは一致すると予測し、これを実証している。さらに仕上面の創成には、研削溝同士の干渉における側縁の盛上がりが大きな影響を及ぼすことを示している。

第7章は結論である。

以上要するに 本論文は、セラミックス研削における延性・脆性遷移点の存在を初めて確認し、超精密研削技術の基本的な考え方を確立したもので、精密加工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。